工 學 碩 士 學 位 論 文

쇼트피이닝 加工된 스프링鋼의 低溫疲勞 進展特性에 관한 研究

2001년 12월

釜慶大學校 一般大學院

精 密 機 械 工 學 科

朴 相 昨

工 學 碩 士 學 位 論 文

쇼트피이닝 加工된 스프링鋼의 低溫疲勞 進展特性에 관한 硏究

指導教授　朴 卿 東

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2001년 12월

釜慶大學校 一般大學院

精 密 機 械 工 學 科

朴 相 昨

이 論文을 朴相昨의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2001年 12月

主 審	**教授 金 榮 大**	**(印)**
委 員	**教授 金 亨 資**	**(印)**
委 員	**教授 朴 卿 東**	**(印)**

목　　차

제 1 장 서 론

기계, 항공기, 자동차 등에서 요구되는 고응력화는 부품의 경량화를 요구한다. 따라서 사용되는 재료, 특히 철강재는 고응력화되어야 한다는 것이 필수적인 사항이 되고 있다.

그러나 부품에 반복되는 하중 즉 피로하중이 작용함에 따라 어느 순간 파괴되어 버리는 현상을 발견할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다[1] [6].

이와 같이 피로강도 저하의 인자 중 철강재의 내부 비금속 개재물의 함유를 제외한 나머지 인자들은 철강재의 표면부위의 결함이 되기 때문에 철강재 표면부위의 결함을 제거하고 표면부위의 피로강도 향상을 위한 쇼트피이닝은 수많은 양의 쇼트볼(Shot Ball)을 일정한 속도로 금속 표면에 투사하는 것으로서, 쇼트 볼에 의해 타격된 금속 표면은 요철면을 이루게 되고, 요철의 깊이는 대개 0.13 0.16mm 정도이며, 또한 표면은 소성 가공에 의한 가공경화층과 압축잔류응력층을 표면부 가까이에 형성하게 된다[4].

여기에서 가공경화에 따른 경도의 증가는 피로수명에 큰 영향을 주지 않으며, 표면의 요철과 압축잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

특히 금속 표면에 압축잔류응력을 형성토록 함으로서 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 억지력을 향상시킨다고 볼 수 있으며, 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성될 수 있도록 하고, 또 압축잔류응력이 높게 형성될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다.

그러나 쇼트피이닝재를 저온영역에서의 피로 시험결과는 찾아보기 힘들었다. 본 연구는 자동차용 스프링재료 사용되는 SUP9강에 대하여 쇼트피이닝 재료 $-68kgf/cm^2$의 압축잔류응력으로 가공된 재료를 상온

25℃, -30℃, -50℃, -70℃ 및 -100℃의 저온환경 속에서 정(+)방향 사인파형 반복 하중을 진폭 20 cycle/sec로서 응력비 R=0.05로 하여 안정성장영역에서 각각의 피로균열진전속도 da/dN와 응력확대계수 폭 ΔK 선도 및 피로균열 하한계특성 ΔK_{th}을 구하고, 온도 및 응력비에 따르는 피로균열진전지수 m 와 재료상수 C를 규명하여 저온에서의 스프링재료 사용되는 SUP9강의 대한 파괴 기준을 제시함으로써 강도상의 안전 설계에 기여하고자 한다[5],[7].

제 2 장 쇼트피닝 가공의 개요

2.1 쇼트피닝 가공의 개념

쇼트피닝 가공은 냉간 가공의 한 방법으로 1920년대에 개발되어 1940년대부터 공업에 널리 응용되기 시작하였으며, 산업 발전의 추세에 따라 기계, 구조물에 대한 대형화, 고속화 및 경량화, 고강도화가 필요하게 되고 높은 피로 강도의 특성 요구가 증가되고 있다.

쇼트피닝 가공이란 금속 부품의 표면에 쇼트볼(shot ball)이라는 강구를 고속으로 금속의 표면에 투사하여 금속의 표면을 해머링(hammering)하는 일종의 냉간 가공이다. 쇼트피닝 가공은 Fig. 1과 같이 쇼트볼이 금속 표면에 고속 충돌하면서 이때 쇼트볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성 변형(plastic deformation)을 주고 표면에서 이탈한다.

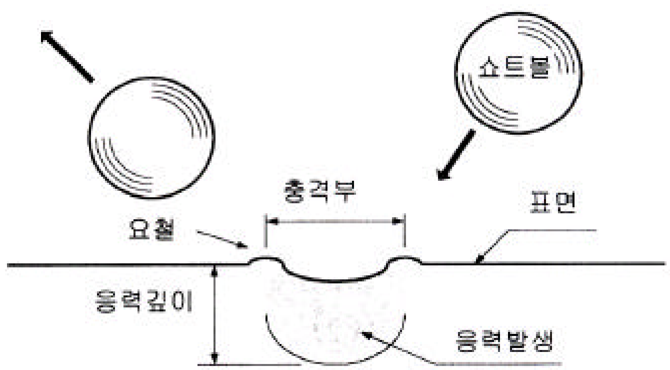


Fig. 1 Principle of controlled shot peening

쇼트볼과 충돌 후 표면층에는 요철이 발생하게 된다. 이 층에는 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 유지하려는 힘이 작용하게 되어 표

면은 잔류 압축 응력, 내부는 인장 응력을 갖고 평형을 이루게 된다.

Fig. 2와 같이 쇼트볼이 충돌후 압축응력이 잔류하게 되는데 응력의 크기는 크지만 응력은 가공 조건에 따라 약간에 차이는 있으며, 일반적으로 표면에서 깊이 0.1 0.5mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm 까지 분포층을 형성시킬 수도 있다. 이러한 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 압축잔류응력을 남게 함으로써 반복인장이 작용할 때 압축잔류응력은 점점 상쇄되어 압축잔류응력이 사라지게 될 때까지 피로 수명을 연장하게 된다.

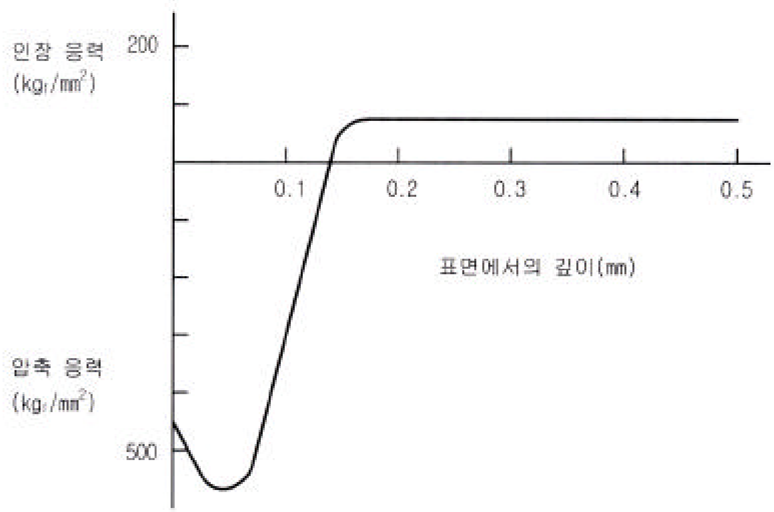


Fig. 2 Distribution of residual stress on surface layer

쇼트피닝 가공에서 금속의 작은 볼의 충격에 의한 자국은 쇼트볼의 직경, 자국의 깊이, 체적의 함수로 형성된다. 소성 영역은 쇼트볼의 속도, 쇼트볼의 직경 그리고 쇼트피닝 가공되는 재료의 경도에 대한 함수의 관계를 갖는다. 쇼트피닝 가공에 의한 소성 영역의 변형층에 잔류응력의 발생과 더불어 경도의 변화를 가져온다. 이 변형층의 경도 분포

에는 가공 경화(work hardening)와 가공 연화(work softening)를 나타낸다. 쇼트피닝 가공된 표면의 잔류 응력은 시험편의 두께에 영향을 받으며, 쇼트피닝 가공 조건에 대한 극한 두께에서는 감소하게 된다[8].

일반적으로 표면 가공법에는 침탄, 질화와 같은 열을 이용한 방법과 냉간압연, 그라인딩, 표면 연마와 같은 기계적인 표면 가공법이 있다. 쇼트피닝은 특수 가공으로서, 일반적인 표면 가공과 쇼트피닝 가공을 몇 가지 비교해본다면, 열처리법은 재료의 종료에 따라 구별해야 한다는 적용상의 제한이 있으며, 이와 반대로 기계적 처리법은 재료의 종류에 영향을 받지 않지만 재료의 기하학적인 형상에 제약을 받는다는 단점이 있다. 하지만 쇼트피닝 가공은 이런 적용상의 문제점들을 해결할 수 있으며, 피로 강도의 증가에도 크게 기여하고 있다. 이러한 쇼트피닝 가공에 대한 연구는 중요성이 인식되어 쇼트피닝 가공조건, 쇼트볼 선정, 압축잔류응력, 피로강도, 피로 수명등 다양한 연구가 진행되었으나, 산업체에서는 쇼트피닝 가공에 대한 체계적인 연구와 데이터가 극히 일부에 국한되어 있고 매우 미진한 상태이다.

쇼트피닝 가공 기술은 특수 가공 기술로서 경량화, 고강도화 사용수명 연장을 통해 에너지 절약을 꾀할 수 있어 청정기술로 적용할 수 있는 매우 고부가 가치적인 산업이다. 또한 쇼트피닝 산업은 기계, 자동차 부품, 철구조물, 철강, 전자, 항공은 물론이고 금형, 플라스틱, 건설까지 전산업 분야에 확대되고 있으며 시장규모를 볼 때 1천억원 이상의 시장이 형성되어 있다.

대학 및 연구소에서는 학문적인 연구와 분석 기술 개발의 연구가 필요하고 산업체에서는 적용 범위의 확대와 자동화, CNC화, 컴퓨터화에 대한 연구를 진행하여 쇼트 피닝 가공 기술의 활성화를 도모해야 할 것이다[4].

2.2 쇼트피닝기의 구조

1. 쇼트볼을 가속하여 운동 에너지를 만드는 쇼트볼 투사장치의 임펠러
2. 투사되었던 쇼트볼을 다시 사용하기 위한 쇼트볼 순환 장치
3. 마모와 파손으로 인한 쇼트볼을 선별하는 쇼트볼 선별 장치
4. 쇼트볼의 부족시 보충해 주는 쇼트볼 공급 장치
5. 가공물에 균일한 쇼트피닝 가공을 하기 위한 제품 이송 장치
6. 투사로 인한 쇼트볼의 흩어짐 방지를 위한 캐비닛
7. 쇼트피닝 가공시 제품의 스케일, 먼지 쇼트볼의 파쇄로 인한 분진 등을 제거하기 위한 집진장치
8. 생산 공정의 공정 관리를 위한 쇼트피닝기 제어용 컨트롤 판넬[8]

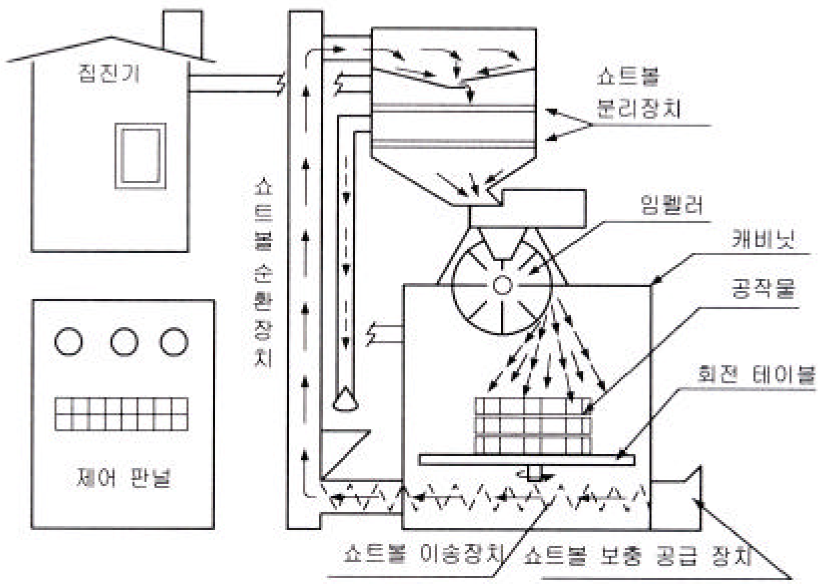


Fig. 3 The structure of shot peening machine

제 3 장 이론적 배경

3.1 피로균열의 파괴역학적 개념

파괴라는 이론적 현상은 미관적 조직이나 파괴기구의 영향을 강하게 받기 때문에 여러 가지 학문적 수법이 요구된다.

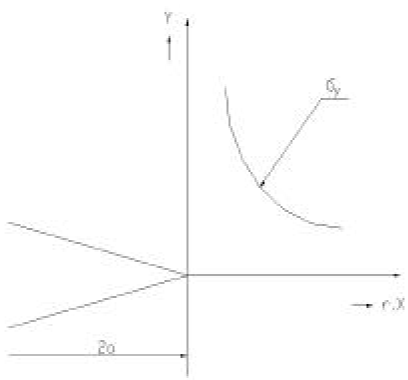
재료의 부재나 구조물을 연속체로 보고 파괴의 현상을 거시적인 입장에서 다루는 선형탄성파괴역학(LEFM : linear elastic fracture mechanics)은 균열 또는 예리한 노치를 갖는 부재 혹은 구조물의 강도나 변형을 선형탄성론으로부터 얻어진 결과를 기초로 하여 취급하는 분야의 하나이다[9].

길이 $2a$인 관통 균열이 있는 무한판이 균일인장응력 σ를 받고 있는 경우를 생각해 보면 균열 선단으로부터 거리 r 인 곳에 있는 요소 dx, dy 는 응력 σ_x, σ_y 및 τ_{xy}등을 받는데 이들은 Fig. 4의 좌표계로서는 다음과 같이 표시할 수 있다[10].

$$
\begin{aligned}
\sigma_x &= \sigma\sqrt{\frac{a}{2r}}\cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \sin\frac{\theta}{2}\cdot\sin\frac{3}{2}\theta\right] \\
\sigma_y &= \sigma\sqrt{\frac{a}{2r}}\cos\frac{\theta}{2}\left[1 + \sin\frac{\theta}{2}\cdot\sin\frac{3}{2}\theta\right] \qquad \text{-------}(1) \\
\tau_{xy} &= \sigma\sqrt{\frac{a}{2r}}\sin\frac{\theta}{2}\cdot\cos\frac{\theta}{2}\cdot\cos\frac{3}{2}\theta \\
\sigma_z &= 0 \ \text{(plane stress)}
\end{aligned}
$$

파괴가 Mode Ⅰ에서 발생할 때 식 (1)에서 $\theta = 0$일 때 균열선단에서의 σ_y의 분포는 $\sigma_y = \sigma\sqrt{\frac{a}{2r}}$가 되고 이를 Fig. 5에 표시하면 응력확대계수 K_1[11]은

$$K_1 = \sigma\sqrt{\pi a} \qquad \text{-------}(2)$$



그러므로 식 (1)**은 일반적으로** K_1**을 사용하여**

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \qquad \text{-------} (3)$$

로 표시할 수 있다.

식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 균열 선단에서 응력의 크기 σ_y 는 K_1에 의존함을 알 수 있고 균열 진전거동도 K_1의 영향을 크게 받을 것임을 용이하게 단정할 수가 있다.

본 연구에서는 응력확대계수 K의 이러한 성질을 이용하여 균열 길이에 대한 K값을 제어하여 시험을 행하였다.

선형파괴역학은 균열 선단부근의 소성역의 크기가 작은 소규모항복상태에 운용이 되며 균열 선단부근의 소성역의 크기를 고려하는 경우 응력확대계수 K는 보정이 필요하다.

탄성과 소성의 경계조건 즉, σ_y를 항복강도 σ_{ys}로 대치하면 $\theta = 0$에서 식 (3)은

$$\sigma_{ys} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r_p^*}} \qquad \text{-------}(4)$$

로 표시되며 여기서 r_p^*는 이론상의 소성역의 크기이다.

일반적으로 역학적 평형조건으로부터 실제의 소성역의 크기 r_p는 $r_p = 2r_p^*$ 가 됨이 밝혀져 있다(Fig. 6). 즉,

$$r_p^* = \frac{1}{2\pi}\frac{K_\mathrm{I}^2}{\sigma_{ys}^2} \ \text{(plane stress)} \qquad \text{-------}(5)$$

로 표시할 수 있으며

$$r_p = \frac{1}{\pi}\frac{K_\mathrm{I}^2}{\sigma_{ys}^2} \ \text{(plane stress)} \qquad \text{-------}(6)$$

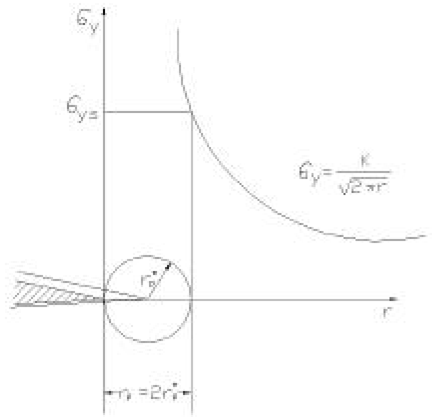


Fig. 6 Plastic zone at the crack tip

소성역의 반경 r_p^***를 고려한 균열 길이 즉** $a + r_p^*$ **를 유효 균열 길이라 하며 이것을 고려한 응력확대계수** K**를 유효응력확대계수** K_{eff}**라고 한다. 식** (5)**를 식** (2)**에 대입시키면**

$$K_{eff} = \sigma\sqrt{\pi[a + \frac{1}{2\pi}(K_{\mathrm{I}}^2/\sigma_{ys}^2)]} \qquad \text{-------}(7)$$

이 되며 이것을 다시 정리하면

$$K_{eff} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{[1 - \frac{1}{2}(\sigma/\sigma_{ys}^2)^2]^{1/2}} \qquad \text{-------}(8)$$

로 표시된다.

3.2 피로균열 진전거동에 있어서 파괴역학의 적용

피로에 대하여 파괴역학의 본격적인 적용은 1960년대부터이며, 파괴역학적 입장에서 정리한 피로균열진전속도에 관한 실험법칙과 이론은 극히 다양하다.

그 예로서 Liu에 의하여 $da/dN = Ba$와 Frost와 Dugdale에 의한 $d(2a)/dN = Const$ 및 McEvily에 의한 $d(2a)/dN = f(\sigma_0)$ 등을 들 수 있으나, Irwin의 응력확대계수 K가 균열선단에서의 응력의 크기를 특성지워주는 Parameter이므로 K의 함수로서 균열 진전속도를 나타냄이 가장 적절하리라는 추측이 간다. 즉 $K_{\max}$, $K_{\min}$, ΔK 및 K_m 등의 함수로서 주어지는 양은, 예컨데 균열진전속도와 밀접한 관계가 있어야 한다.

지금 일정진폭의 반복하중을 작용시켰을 경우 응력확대계수 K에 대하여 살펴보면 반복하중회수(N)의 증가에 따라 K가 변화하며 즉, 최대응력확대계수 $K_{\max}$, 최소응력확대계수 $K_{\min}$, 응력확대계수폭 $\Delta K (= K_{\max} - K_{\min})$ 및 평균응력확대계수 $K_m \left\{= \frac{1}{2}(K_{\max} + K_{\min})\right\}$은 균열 진전에 따라 변화한다. 즉,

$$
\begin{aligned}
da/dN &= f_1(\Delta K, R) \\
da/dN &= f_2(K_{\max}, R) \qquad \text{-------} (9) \\
da/dN &= f_3(\Delta K, K_{\max})
\end{aligned}
$$

여기서 R은 응력비(stress ratio)이며

$2a$: 균열 의 길이

f_i : 작용응력의 함수 ($i = 1, 2, 3$)

σ_0 : 균열 선단에서의 응력

N : 하중반복회수

균열 진전속도 da/dN을 응력확대계수 K로서 표시하면 다음과 같은 특징이 있다.

첫째로, 서로 다른 균열 진전특성을 나타내는 각종 시험편의 da/dN을 K로 정리하면, 동일 선상에 오게 된다.

둘째로, 높은 응력상태하에서 작은 균열이나 낮은 응력하에서의 긴 균열에 상관없이 K가 같으면 균열 진전속도 da/dN가 일정하게 된다.

셋째로, 균열 진전속도 da/dN와 응력확대계수폭 $\varDelta K$를 양 대수좌표로 표시하면 3단계구간이 나타나는데 균열의 안정성장구간 즉 2단계구간 선형영역에 있어서는 $\log \varDelta K$와 $\log(da/dN)$의 직선관계를 나타내는

$$da/dN = C(\varDelta K)^m \qquad \text{-------}(10)$$

의 식이 일반적으로 성립하며, 여기서 C와 m은 재료상수이다[14] [17].

이 식은 각종 금속재료외에 고분자재료나 K의 적용이 문제가 되는 고연성재료의 고$\varDelta K$영역에서도, 각종 균열에 대하여 일반적으로 성립한다. Paris와 Erdogan은 직선의 경사 즉 식 (10)에서 $m = 4$가 넓은 영역에 걸쳐 특성이 잘 맞는 이유에서 다음과 같은 사승식을 제시하였다.

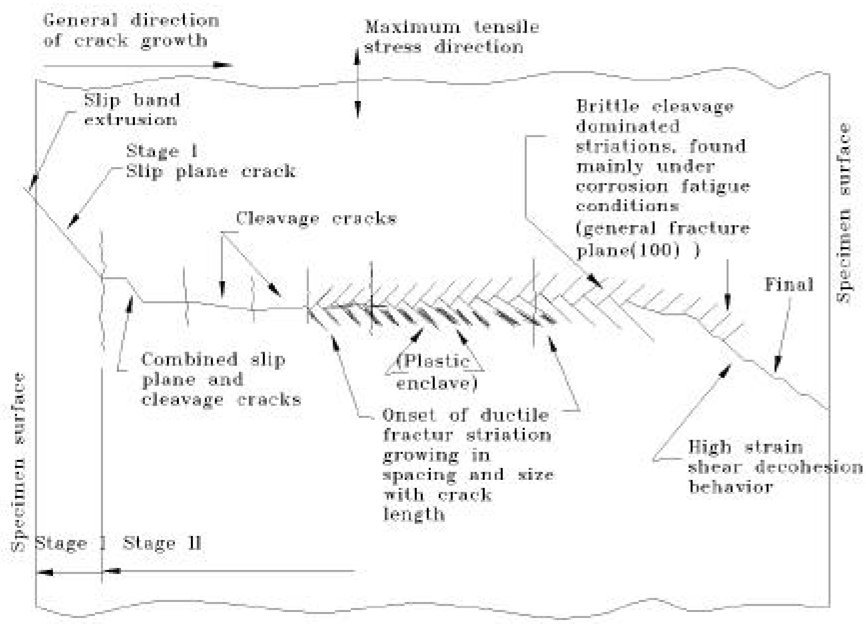
$$da/dN = C(\varDelta K)^4 \qquad \text{-------}(11)$$

그러나 많은 시험결과는 재료에 따라서 단 하나의 값으로 정의하는 것은 어렵다는 것이 밝혀졌다.

즉, m은 0.4 8.0 정도의 넓은 값을 취하며 C도 10^{-5} 10^{-18}정도의 값을 가짐을 지적하였다.

3.3 피로균열 진전거동

균열선단에서 응력-변형률이 금속의 거동을 지배한다는 피로역학의 개념은 이미 존재해 있는 균열로부터 해석한다는 의미에서는 피로파괴 성장과 같다.



여기서 균열선단에서의 응력-변형률의 성질은 응력확대계수 (stress intensity factor) K로 표시되고, 반복 응력확대계수와 피로균열진전속도와도 관계가 있다.

한편 균열의 성장률을 표시하면 Fig. 7와 같이 3개의 분리된 영역으로 나타난다.

이처럼 균열의 성장률을 나타냄으로서 주어진 하중에서 어느 정도 크기의 균열까지는 안전한가 또는 주어진 균열크기에 어느 하중까지는 얼

마동안 안전한가 등 여러 가지 공학적 중요한 문제를 해결하는데 이용할 수 있다.

여기서 C와 m은 재료상수이고 보통 m은 0.5 0.8의 넓은 범위에서 변화한다. 그러나 식 (12)는 실험재료를 총괄적으로는 나타내지 못한다. 실제로 Fig. 5에서 da/dN와 ΔK의 관계는 S형 모양을 갖거나 부분적으로 다른 기울기를 가진다.

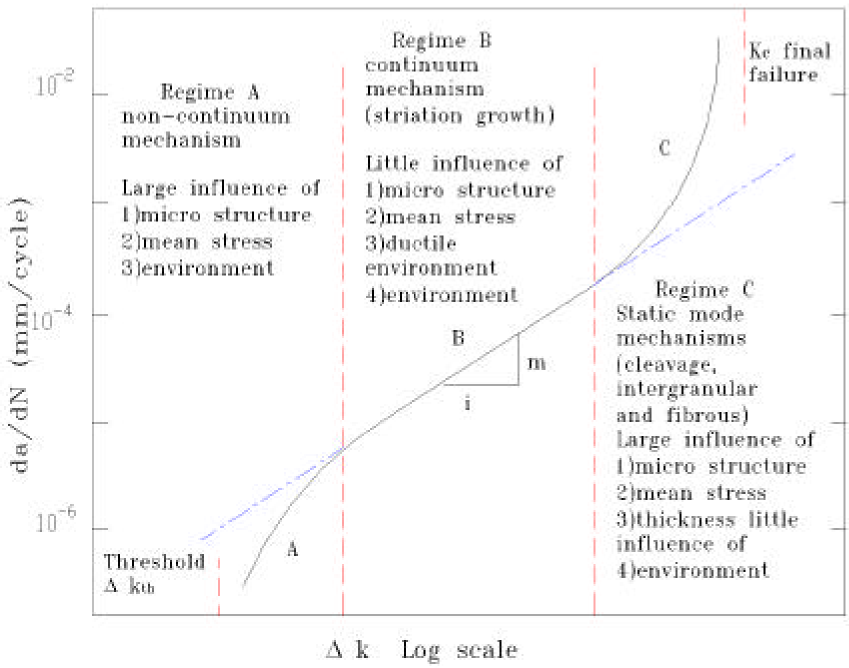
ΔK 범위의 최상부 끝을 벗어남은 da/dN가 유한으로 되어야 하는 균열이 임계값에 도달하는 것일 때 예상될 수 있다. 최종파괴는 사이클 동안에 응력확대계수 K_{1c}에 도달한 상태에서 일어난다.

최대응력확대계수 K_{max} 및 응력비 R의 영향도 고려해 넣으면 다음과 같이 일반화된다. 즉,

$$\frac{da}{dN} = f_1(K_{max}, \Delta K) = f_2(R, \Delta K) \qquad \text{-------}(12)$$

여기서 응력비 $R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$ 이다.

3.4 응력 확대계수범위의 결정



propagation rate da/dN with stress intensity factor range ΔK

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad \text{-------}(13)$$

여기서 $\alpha = a/W$, **위 식은** $a/W \geq 0.2$**에 대하여 유효하다.**

CCT **시험편에 대하여** ΔK**는 다음 식으로 계산한다.**

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B}\sqrt{\frac{\pi\alpha}{2W}\sec\frac{\pi\alpha}{2}} \quad \text{-------}(14)$$

여기서 $\alpha = 2a/W$, 위식은 $2a/W < 0.95$에 대하여 유효하다. 또 전술한 대로 CT시험편은 인장-압축부하에 대하여 권장하지 않으나 CCT시험편에 대하여 그 제한은 없다. 따라서 CCT시험편에 대하여 하중범위 ΔP는 다음 식으로 정의된다.

$$\Delta P = \begin{cases} P_{max} - P_{min} & (R > 0) \\ P_{max} & (R \leq 0) \end{cases} \qquad \text{-------}(15)$$

특히 응력비 R에 관계없이 $\Delta P = P_{max} - P_{min}$이라 정의해 $da/dN - \Delta K$ 관계를 표시한 보고가 많다. $R < 0$의 결과를 조사하는 경우 주의를 요한다. 선형탄성 파괴역학의 범위내에서 $\Delta P = P_{max}$이라 하면 $R \leq 0$의 R이 $da/dN - \Delta K$관계에 영향을 미치는 일은 없다.

3.5 균열진전의 하한계 측정

10^{-8} m/cycle 이하에서 균열진전의 하한계 ΔK_{th}에 이르는 da/dN을 상술한 정하중진폭시험으로 측정하는 경우, 피로 예균열 도입때의 K_{max} 및 시험개시때의 K_{max} 또는 ΔK가 현저한 영향을 미친다. 진(眞)의 da/dN - ΔK 관계는 하중이력이 무시되는 이상 균열에 대하여 시험개시때의 ΔK_{th}와 거의 같은 ΔK를 준 경우에만 얻어진다. 이것을 달성하는 것은 용이하지 않다. 따라서 하중 점감시험이 일반적으로 행하여지고 있다. ASTM에서는 E647-81의 개정에 이어 10^{-8} m/cycle의 da/dN측정을 포함하여 '정상상태의 피로균열 진전속도의 시험방법'을 검토중이다. 아래에 그것을 소개한다[(12),(13),(16),(20)].

R일정의 경우 K구배는 다음에 의해 정의된다.

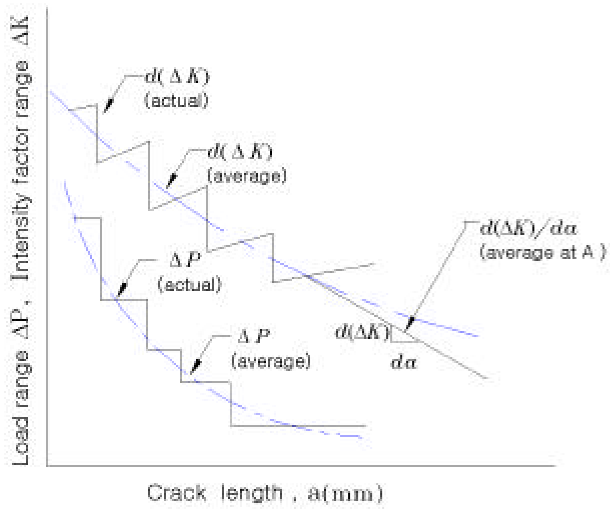
$$C \equiv \frac{1}{K}\frac{dK}{da} \equiv \frac{1}{K_{max}}\frac{dK_{max}}{da} \equiv \frac{1}{K_{min}}\frac{dK_{min}}{da} \equiv \frac{1}{\Delta K}\frac{d\Delta K}{da} \qquad \text{-------(16)}$$

K 증가시험은 C가 정(正), K감소 시험은 C가 부(負)가 된다. 하중은 계단상으로 감소시켜도 연속적으로 감소시켜도 좋다. C의 값으로 다음이 권장된다.

$$C \geq -0.08 \ \text{mm}^{-1} \qquad \text{-------(17)}$$

하중을 계단상으로 감소시키는 경우에도 Fig. 9을 참조하여 이것에 준한다. 단 P_{max}의 감소는 10%이하로 하여 감소후에

$$\Delta a \geq 0.50 \ \text{mm} \qquad \text{-------(18)}$$



$da/dN = 10^{-9} \quad 10^{-10}$ m/cycle**의 범위를 등분할한** 5**점이상의 데이터를 사용하여** $da/dN - \Delta K$ **관계를 양대수좌표상에 최적 직선으로 근사한다**. **이 최적직선에서** $da/dN = 10^{-8}$m/cycle **에 대응하는** ΔK**를 결정하여** ΔK_{th}**로 한다**.

상기의 시험방법에 대한 비판이 적지 않다. **우선 상기의** C**의 조건을 만족하지 않는 경우에도** ($C \geq -1\ mm^{-1}$), C**는** ΔK_{th}**에 영향을 미치지 않는다**. **또 통상의 재료 및 시험편 치수에 대하여 상기의** Δa**의 조건을 만족하기에는 매우 어렵다**. $da/dN = 10^{-9} \quad 10^{-10}$ m/cycle**의 범위를 등분할한** 5**점 이상의 데이터를 얻기 위해 최저** 5×10^{7}**회의 하중 반복이 필요하게 되는 것은 명심해야 한다**.

또한 K 점감시험에 진(眞)의 ΔK_{th}가 얻어지는가 아닌가에 대해서도 의문이 있다. 아래에서 설명한 것과 같이 대기중에서 ΔK_{th}는 프레팅(fretting)산화물 유기균열개구에 지배되어 있다. 프레팅(fretting) 산화물의 생성은 하중, 환경조건에 강하게 영향되며 ΔK_{th}의 평가와 시험방법의 검토는 금후의 과제로서 아직 남아 있다.

제 4 장 실험장치 및 방법

4.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프링강 SUP9 이며, 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2 와 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.55	0.22	0.73	0.11	0.005	71

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile Strength (MPa)	Hardness (H_{RB})		Elongation (%)	Reduction of area (%)
	after Quenching	after Tempering		
1742	2.35	2.75	11.4	41.9

쇼트피이닝은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일 스프링 제조용 쇼트피이닝기와 엔진벨브 스프링 제조용 쇼트피이닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다.

또한 시험편이 단면임을 감안하여 표면 전체에 균일한 쇼트피이닝 가공면을 얻기 위하여 Fig. 10와 같이 시험편의 양단을 치구로 고정하여 2개의 자전 로울러 위에 올려놓고 쇼트 볼 투사하였다[4].

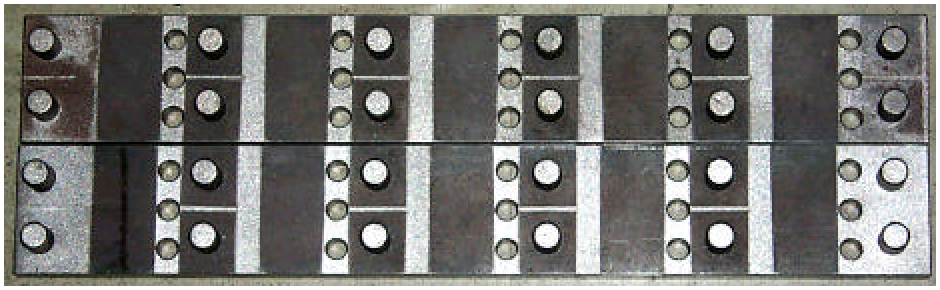
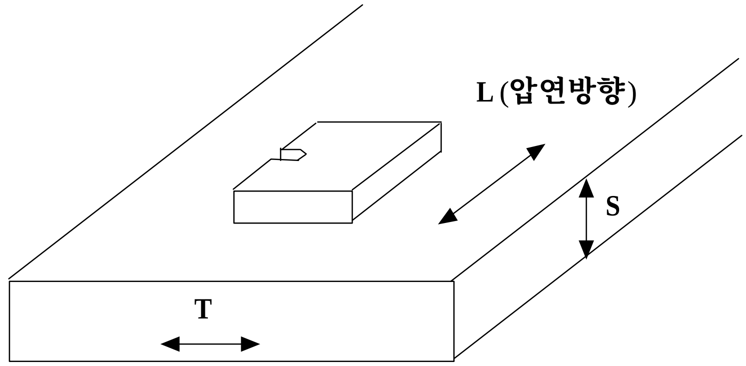


Fig. 10 Fixture of specimen

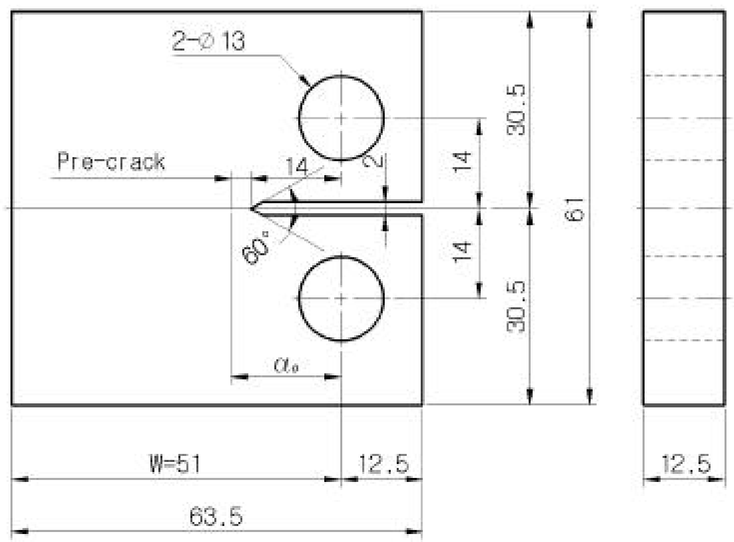
Table 3 Conditions of Shot-peening

Condition	Shot - Peening
Impeller Dia	490 mm
Blades Width /Q'ty	90mm/6 pcs
r.p.m	2200 r.p.m
Shot-Ball Dia.	0.8 mm
Time	24 sec.
Arc Height (Alman A-Stip)	0.375 mm
Coverage	85 %

그리고 시험편은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용 L-T방위로 채취하여, 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링(milling)으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(Wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반경 0.1mm가 되게 가공하였다. Fig. 11의 (a)는 시험편의 채취 방향을, (b)는 그 형상과 치수를 나타낸 것이다[14],[15].



(a)



(b)

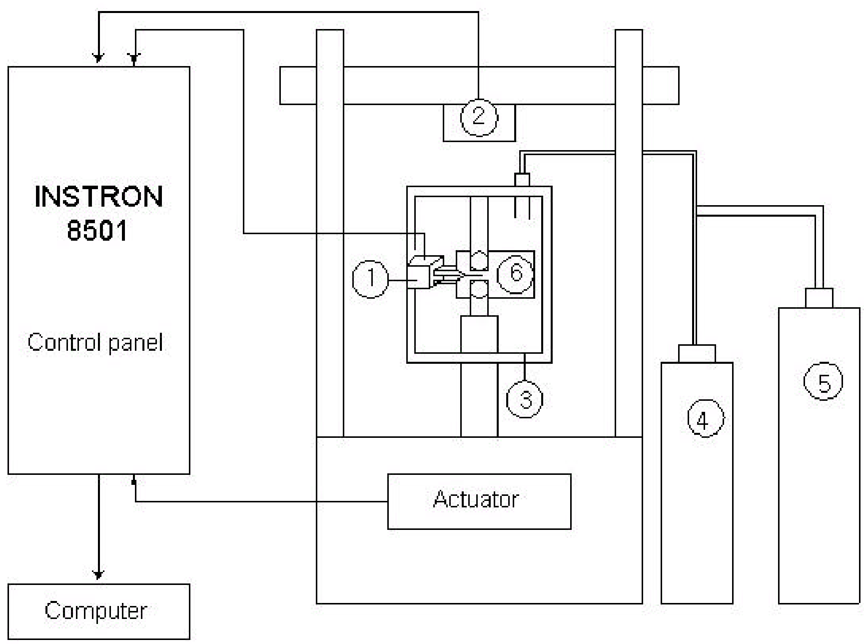
Fig. 10 Configuration of CT-specimen

Fig. 11은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용, L-T방위로 채취하여 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93(1993)의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60° 의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.

그리고 피로균열진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25℃정도의 온도환경과 항복강도이내의 응력범위에서 ASTM(1993) E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다[18].

4.2 실험 장치

Fig. 11은 본 실험에 사용된 피로시험기의 구조이고 Fig. 12는 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 100KN) 이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD 클립게이지를 부착한 compliance법을 사용하였으며, 파단면의 미시적 촬영은 Fig. 13의 주사식 전자현미경(S.E.M)을 사용하였다(1) (3).



① COD-Gauge ② Load cell ③ Chamber(Low temperature)
④ Liquid nitrogen bomb ⑤ Nitrogen gas bomb ⑥ CT-Spcimen

Fig. 11 Schematic diagram of low temperature fatigue testing machine

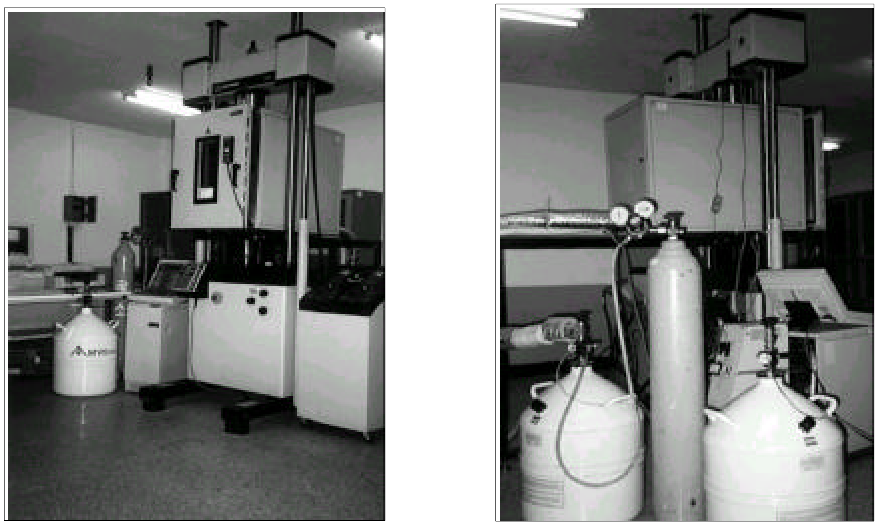


Fig. 12 Apparatus of fatigue test machine(INSTRON 8501)

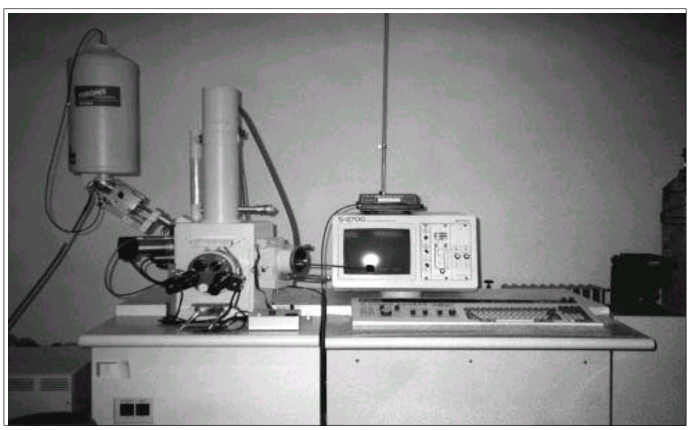


Fig. 13 General view scanning electron microscope (model S-2570)

4.3 실험 방법

4.3.1 잔류 응력

쇼트 피이닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기 (RIGAKU - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10 20μm 단위로 연마 해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다[5].

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffration	Condition	
X-Ray Source	Taget	Cr-V
	Voltage	30 KV
	Current	10 mA
Ψ	0 ° ,15 ° ,30 ° ,45 °	
2θ	140 ° 170 °	
Diffration	Scintillation Counter	

4.3.2 피로시험

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현파형으로 하였다.

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 봄베를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소봄베의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 ±1℃로 유지하였고 응력비 R=0.05 20Hz, 실험온도는 25℃ 와 -30℃, -50℃, -70℃, -100℃로 하였다[1] [3].

실험해석을 하기 위해 응력확대계수K는

$$\Delta K = \begin{cases} K_{max} - K_{min} & (K_{min} > 0) \\ K_{max} & (K_{min} \leq 0) \end{cases} \qquad (1)$$

및 응력비

$$R = K_{min} / K_{max} \qquad (2)$$

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의 ΔK의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인 (Paris and Erdogan, 1963)

$$da / dN = C(\Delta K)^m \qquad (3)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서 C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위 ΔK는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K-감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다. ΔK의 기울기는[(13),(15),(19)]

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \qquad (4)$$

da/dN의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5$mm

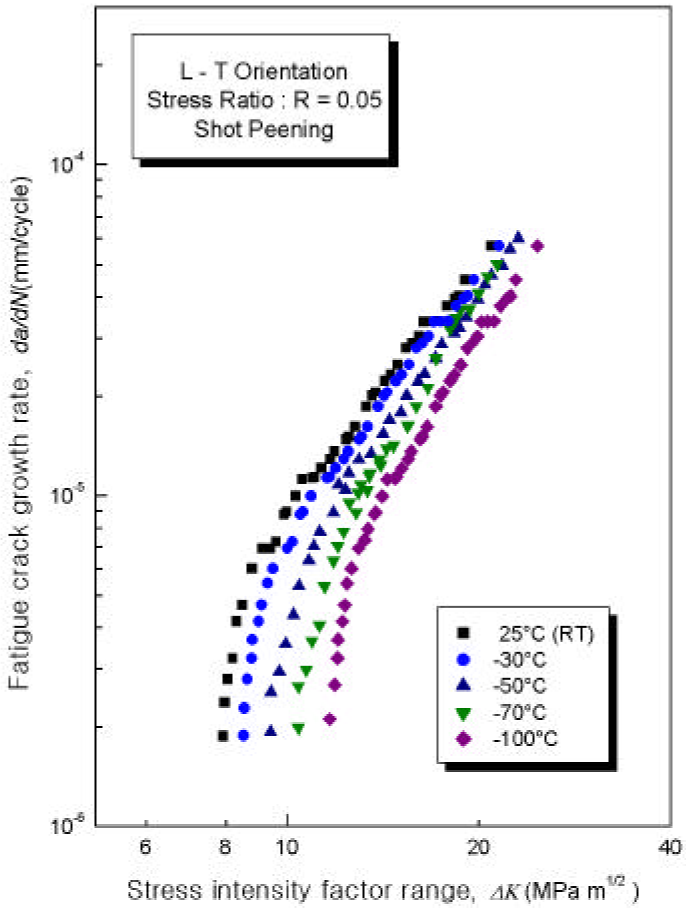
5. 실험결과 및 고찰

5.1 Shot peening재의 저온피로균열 전파특성

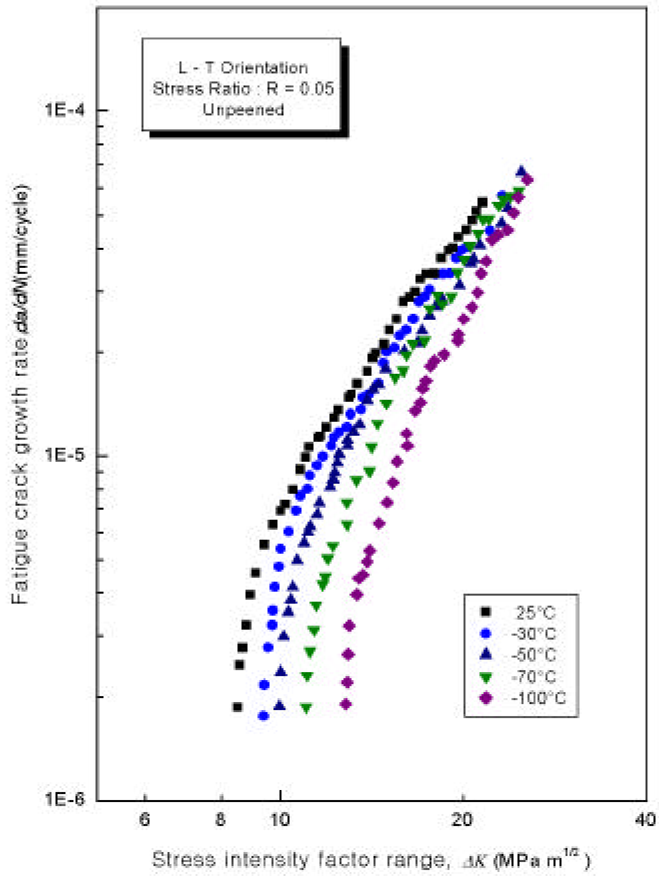
Fig. 15에 쇼트피닝에 의해 -68kg/cm^{2}의 압축잔류응력으로 가공된 스프링강 SUP9에 Unpeened재와 Shot peening재에 대하여 CT시험편으로 응력비 R=0.05에서 시험온도 25℃(RT), -30℃, -50℃, -70℃ 및 -100℃에서의 점감하중법에 의해 피로균열 전파속도 da/dN와 응력확대계수 범위 ΔK의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 동일한 ΔK에서 저온으로 갈수록 da/dN의 관계는 직선적으로 증가하고 있으며, 또한 Fig. 15에서 (a), (b)의 그래프를 비교하여 보면 Unpeened재가 Shot peening재보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 또한 실험 결과 Shot peening 및 Unpeened재는 온도가 내려갈수록 피로균열 전파초기영역(제 1단계 영역)에서의 피로균열진전 하한계 특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 균열초기 피로저항성이 우수한 것으로 판단되며, 또한 쇼트피닝 가공이 Unpeened재보다 피로수명이 향상은 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속이 판단된다.



(a) Shot peening



(b) Unpeened

Fig. 15 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

5.2 온도에 따른 피로크랙 진전특성

Fig. 16, 17, 18, 19, 20에 각종 차량, 선박 등에 스프링 재료로 사용되고 있는 SUP9강에 대하여 쇼트피이닝에 의해 -68kg/cm^{2}의 압축잔류응력으로 가공된 재료에 응력비 R=0.05로 하여 상온(25℃) -30℃, -50℃, -70℃ 및 -100℃의 저온에서 하중 일정의 점감 시험을 실시하여 피로균열 전파속도 da/dN와 응력확대계수 ΔK관계를 양대수 직선상에 온도별로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 Shot peening재는 상온 25℃의 경우는 $da/dN \geq 4\times10^{-5}$ mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다. 그러나 저온의 경우는, -30℃의 경우가 $da/dN \geq 3\times10^{-5}$ mm/cycle, -50℃의 경우가 $da/dN \geq 2\times10^{-5}$ mm/cycle, -70℃의 경우가 $da/dN \geq 1\times10^{-5}$ mm/cycle, -100℃의 경우가 $da/dN \geq 9\times10^{-5}$ mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다. 또한 Shot peening재가 Unpeened재보다 제 2단계 영역의 da/dN가 높아짐을 알 수 있다.

온도의 저하에 따라 피로균열 진전속도가 감속되어 하한계 응력확대계수 ΔK_{th}에 도달하였다. 온도의 저하에 따라 피로균열 전진속도가 감속되어 Fig. 16, 17, 18, 19, 20에서 하한계 응력확대계수가 8MPa$\sqrt{m}$에서 12.2Mpa$\sqrt{m}$으로 상승함을 볼 수 있다.

또한 온도에 따른 양대수 직선관계의 성립 구간에서 양대수 직선관계의 양상은 동일하게 나타났으며 온도의 저하에 따라 급격하게 감속되어 하한계 응력확대계수에 도달한 것은 저온취성 및 산화물의 크랙캐폐에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

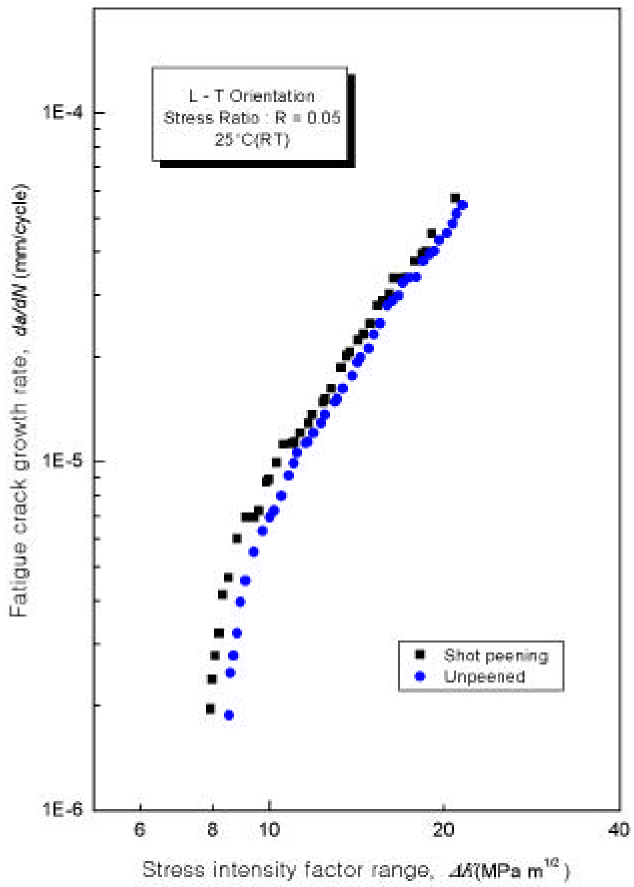


Fig 16. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(25℃)

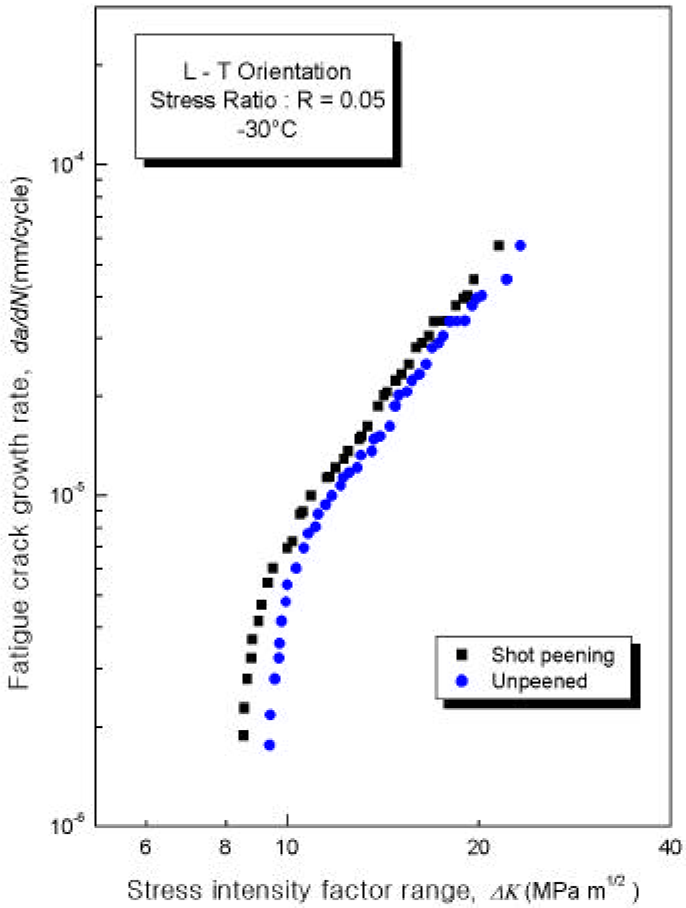


Fig 17. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-30℃)

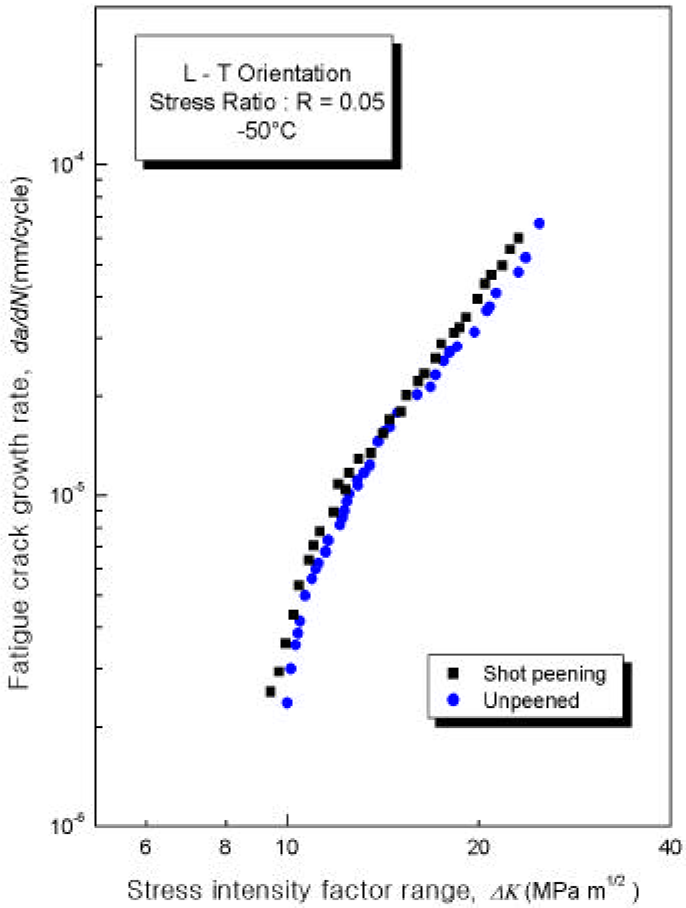


Fig 18. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-50℃)

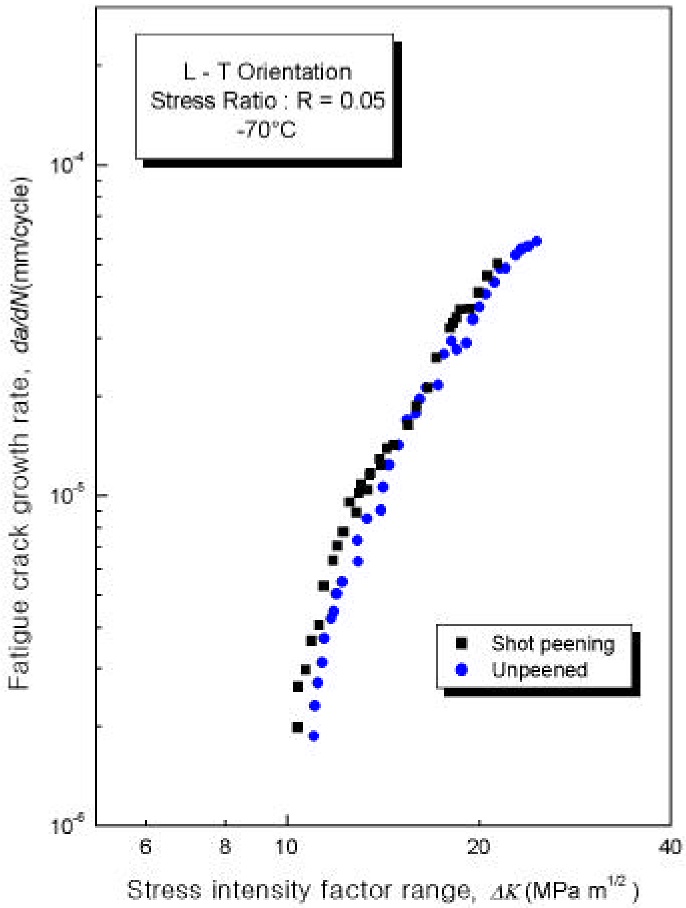


Fig 19. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-70℃).

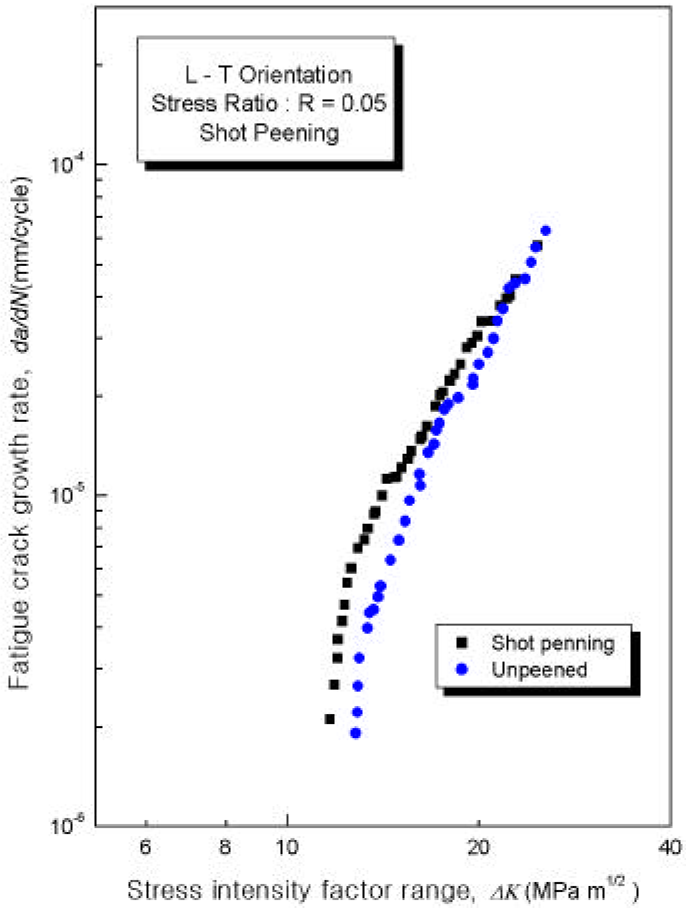


Fig 20. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-100℃).

5.3 저온피로 하한계 특성과 온도와 관계

Fig. 21에 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 -68kg/cm^{2}된 스프링강 SUP9에 대해 상온 25℃에서 -100℃까지 피로 크랙전파 특성 실험을 통하여 하한계 응력확대계수 ΔK_{th}와 온도와의 관계를 나타내었다.

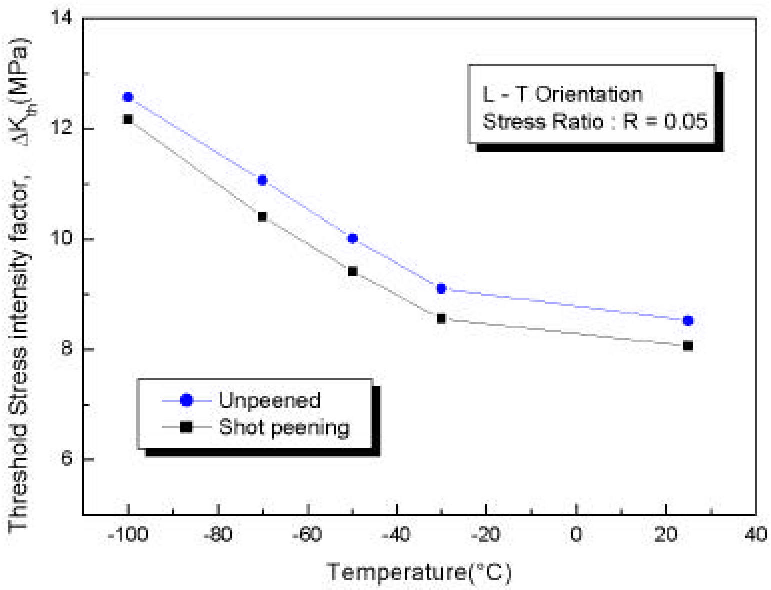


Fig. 21 Effect of Threshold stress intensity factor and temperature(℃)

Fig. 21에서 상온 25℃에서 -40℃까지는 하한계 응력확대계수 ΔK_{th}가 완만하게 증하하다가 -40℃부터 -100℃까지는 급격하게 하한계 증가함을 나타내었다. -40℃부터 급격하게 증가하는 것은 저온취성의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다.

시험결과를 온도별로 표시하여 Table. 5에 나타내었다.

Table 5 The value of fatigue crack growth threshold ΔK_{th} $(Mpa\sqrt{m})$

Tmperature	25℃	-30℃	-50℃	-70℃	-100℃
Shot peening	8.0	8.51	9.4	10.4	12.2
Unpeened	8.5	9.1	10.0	11.7	12.6

5.4 저온변화에 따른 재료상수 *C, m* 관계

피로균열진전과정의 제 2단계 영역에 있어서 $da/dN - \Delta K$는 양대수 선도상에서 직선 관계로 나타났고, 이것을 paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$에 대입하여, 각 온도에 대한 균열진전지수 m 및 재료상수 C를 Table 5에 정리하였고, Fig. 22 및 Fig. 23에는 그 결과를 나타내었다[18].

Shot peening재가 Unpeened재보다 양대수 직선관계가 성립하는 제 2단계 영역에서의 $da/dN - \Delta K$직선의 기울기 즉, 균열진전지수 m의 값이 증가한 것으로 나타났으며, 이것은 재료의 파괴가 시작되면 균열진전속도 da/dN가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 커질 것으로 추정된다.

Table 5 Experimental constants by $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth

	Tem.	**ΔK Range ($MPa\sqrt{m}$)**	**da/dN Range (mm/cycle)**	**m**	**C**
Shot peening	25℃	$10.95 \le \Delta K \le 20.91$	$1.131\times10^{-5} \le da/dN \le 5.701\times10^{-5}$	2.515	2.71×10^{-8}
	-30℃	$10.49 \le \Delta K \le 21.51$	$8.762\times10^{-6} \le da/dN \le 5.721\times10^{-5}$	2.635	1.72×10^{-8}
	-50℃	$11.01 \le \Delta K \le 23.06$	$7.051\times10^{-6} \le da/dN \le 6.022\times10^{-5}$	2.721	1.01×10^{-8}
	-70℃	$11.82 \le \Delta K \le 21.37$	$6.351\times10^{-6} \le da/dN \le 5.031\times10^{-5}$	3.001	3.02×10^{-9}
	-100℃	$12.92 \le \Delta K \le 20.19$	$6.923\times10^{-6} \le da/dN \le 3.36\times10^{-5}$	3.421	5.12×10^{-10}
Unpeened	25℃	$15.95 \le \Delta K \le 21.51$	$2.801\times10^{-5} \le da/dN \le 5.443\times10^{-5}$	2.631	1.81×10^{-8}
	-30℃	$10.01 \le \Delta K \le 23.21$	$5.362\times10^{-6} \le da/dN \le 5.702\times10^{-5}$	2.761	9.42×10^{-9}
	-50℃	$10.41 \le \Delta K \le 24.9$	$3.821\times10^{-6} \le da/dN \le 6.667\times10^{-5}$	2.931	5.09×10^{-9}
	-70℃	$13.34 \le \Delta K \le 24.65$	$8.513\times10^{-6} \le da/dN \le 5.872\times10^{-5}$	3.223	2.01×10^{-9}
	-100℃	$15.32 \le \Delta K \le 25.46$	$8.351\times10^{-6} \le da/dN \le 6.332\times10^{-5}$	3.743	3.05×10^{-10}

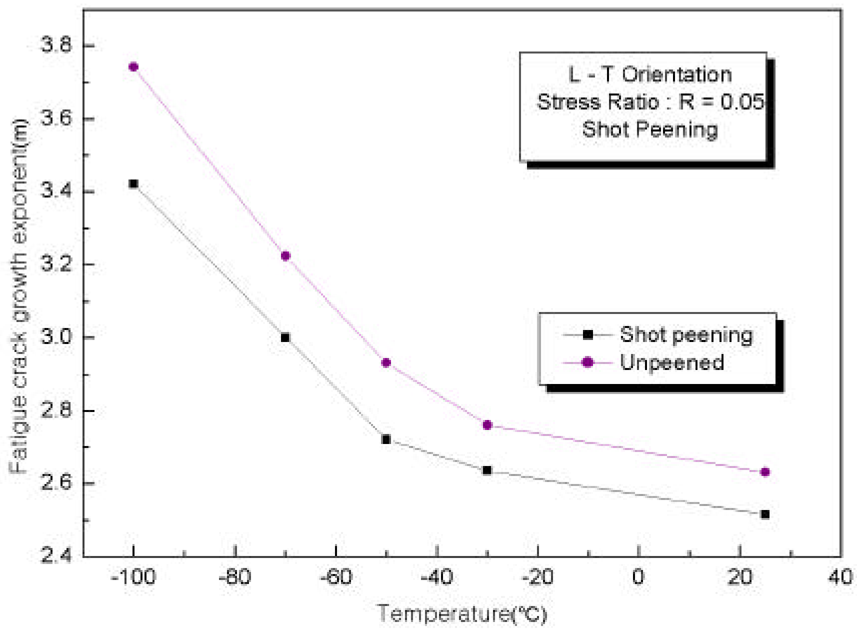


Fig. 22 Relation between fatigue crack growth exponent *m* and Temperature(℃)

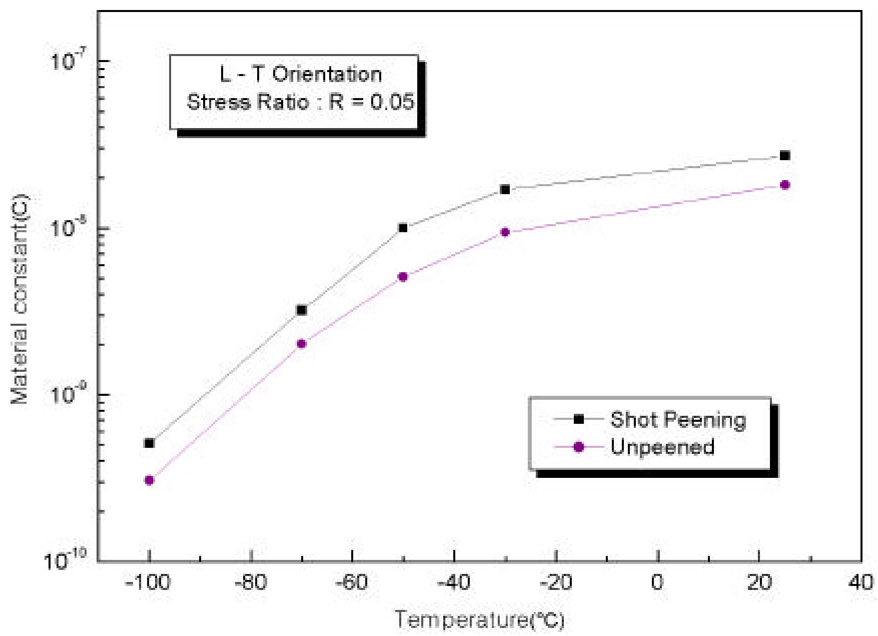
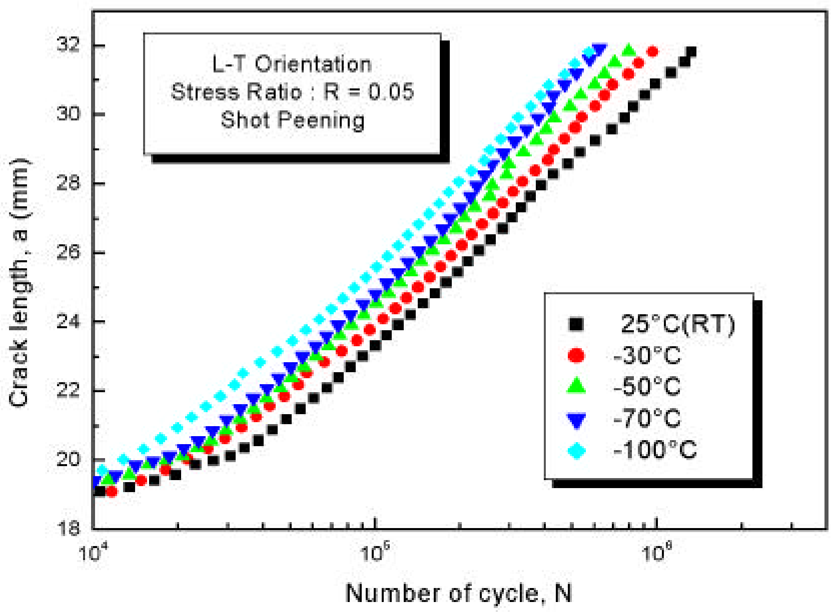


Fig. 23 Relation between material constant C and Temperature(℃)

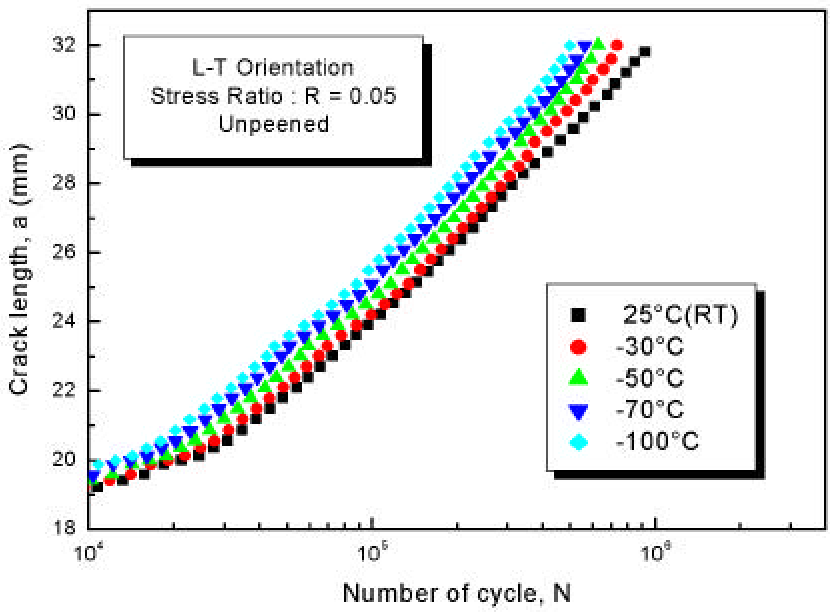
5.5 쇼트피닝재료의 저온에서 피로균열 진전길이와 사이클 수의 관계

Fig. 23은 저온 피로균열 진전길이와 사이클의 관계를 나타내었다. Fig. 23에 의하면 각 온도에 있어서 크랙길이는 저온으로 갈수록 사이클의 수가 줄어드는 것을 볼 수가 있다. Shot peening재의 각각의 사이클은 상온(25℃)에서 1.32×10^6 Cycle, -30℃에서 9.7×10^5 Cycle, -50℃에서 7.9×10^5 Cycle, -70℃에서 6.3×10^5 Cycle, -100℃에서 5.7×10^5 Cycle로 나타났다. 그리고 Unpeened재의 각각의 사이클 수는 상온(25℃)에서 9.2×10^6 Cycle, -30℃에서 7.3×10^5 Cycle, -50℃에서 6.3×10^6 Cycle, -70℃에서 5.6×10^5 Cycle, -100℃에서 5.0×10^5 Cycle로 나타났다. 이처럼 상온(25℃)에서 저온 -100℃로 갈수록 사이클 수가 감소하는 것을 볼 수 있었고 Shot peening재가 Unpeened재보다 사이클 수가 더 많은 것을 볼 수가 있었다.

이러한 현상은 저온 취성이 피로크랙길이와 사이클에 미치는 영향으로 생각되고, 또한 Shot penning재가 Unpeened재보다 피로수명이 향상은 되었는데 이는 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 Shot penning재가 Unpeened재보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.



(a)Shot peening



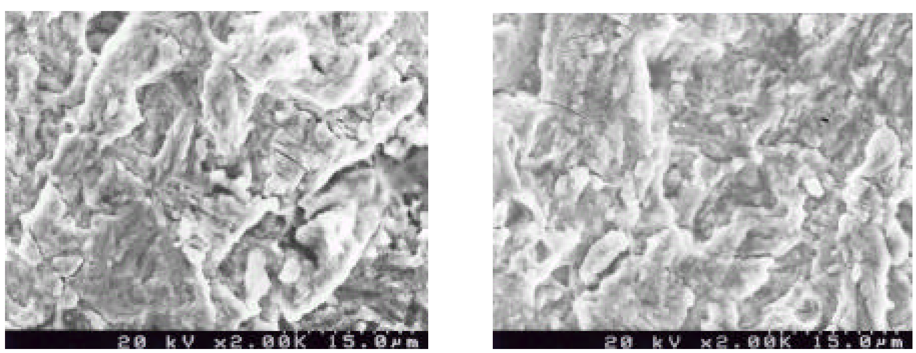
(b) Unpeened

Fig. 23 Relations between Crack length and number of Cycle

5.6 파단면의 특성

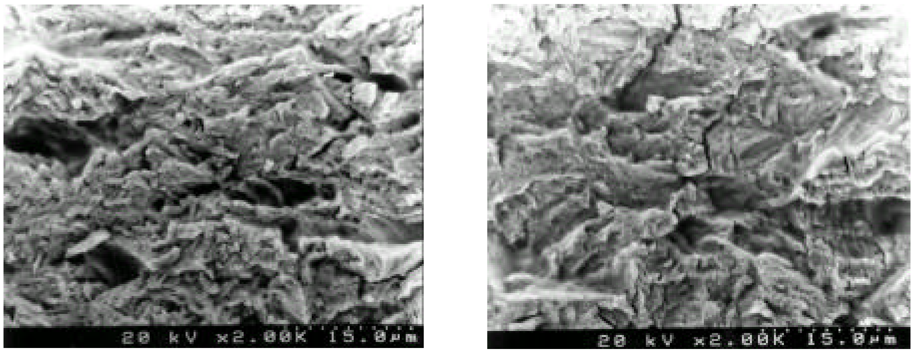
Fig. 24, 25, 26, 27, 28은 스프링강 SUP9에 대하여 상온 25℃와 -30℃, -50℃, -70℃ 및 -100℃ 등의 저온 환경에서, Shot penning재와 Unpeened재에 대한 피로균열진전특성을 K-감소방식으로 시험한 후, 제 2단계 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 나타내었다.

각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 균열선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화가 일어나고, 압축과정에서 재예화가 일어나는 둔화-재예화 과정에 의해 형성되는 것으로 반복응력 1사이클당 스트라이에이션 1개가 형성되는 것으로 보이며 각 온도별 스트라이에션의 크기와 모양은 큰 변화가 없었으나, 파면 조직상의 크기는 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성파괴가 발생한 것으로 판단된다.



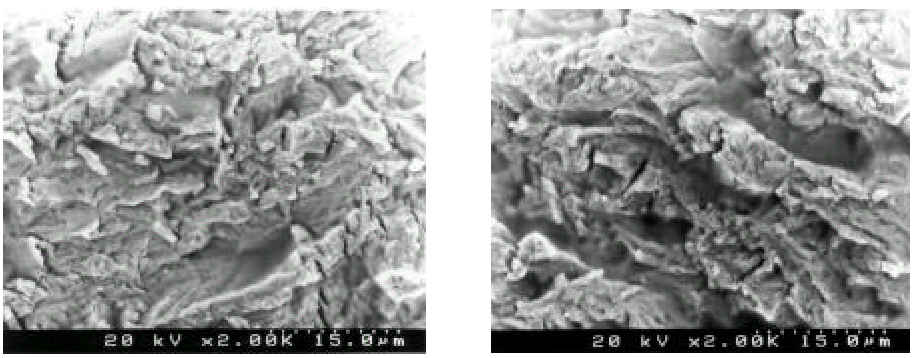
(a) Shot peening, ΔK =16 MPa$\sqrt{m}$ (b) Unpeened, ΔK =16 Mpa$\sqrt{m}$

Fig. 24 Fractograph of fatigue crack growth surface at 25℃(RT)



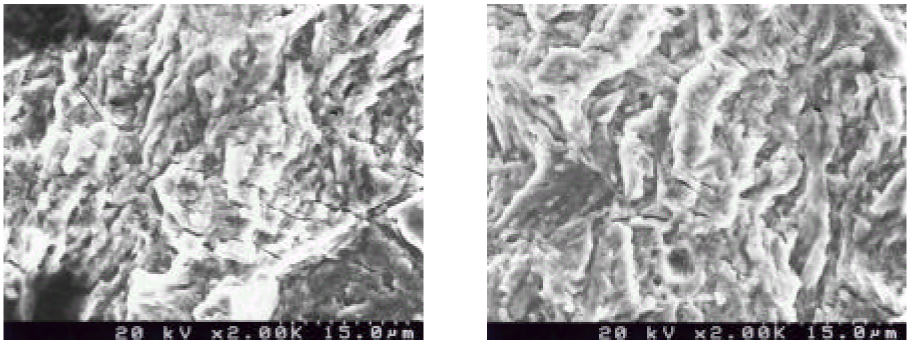
(a) Shot peening, ΔK =16 MPa$\sqrt{m}$ (b) Unpeened, ΔK =16 Mpa$\sqrt{m}$

Fig. 25 Fractograph of fatigue crack growth surface at -30℃



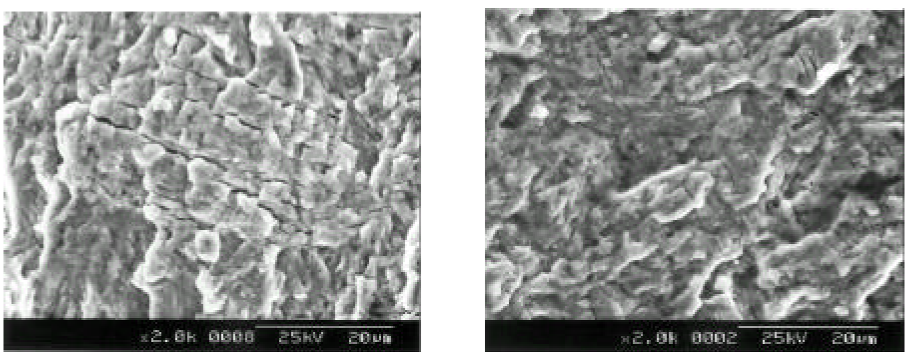
(a) Shot peening, ΔK =16 MPa$\sqrt{m}$ (b) Unpeened, ΔK =16 Mpa$\sqrt{m}$

Fig. 26 Fractograph of fatigue crack growth surface at -50℃



(a) Shot peening, ΔK =16 MPa$\sqrt{m}$ (b) Unpeened, ΔK =16 Mpa$\sqrt{m}$

Fig. 27 Fractograph of fatigue crack growth surface at -70℃



(a) Shot peening, ΔK =16 MPa$\sqrt{m}$ (b) Unpeened, ΔK =16 Mpa$\sqrt{m}$

Fig. 28 Fractograph of fatigue crack growth surface at -100℃

6. 결　론

스프링강 SUP9에 대하여 쇼트피이닝으로 -69kg/cm^{2}의 압축잔류응력으로 가공하여 응력비 R=0.05로 25℃, -30℃, -50℃, -70℃ 및 -100℃의 저온에서 크랙전파시험을 실시하여 스프링강의 저온에서의 크랙전파속도, 크랙전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 피로진전거동에 쇼트피닝 효과에 있어서 상온 25℃의 경우 da/dN-ΔK 양대수 직선관계는 4×10^{-5}mm/cycle까지 성립하다가 -100℃의 경우 9×10^{-4}mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립하였다. 온도의 저하에 따라 양대수 직선관계가 조금씩 감소함을 나타내었다.

2. 저온에서의 하한계 응력확대계수는 상온 25℃에서 -40℃까지는 하한계 응력확대계수는 변화가 없었으나 -40℃부터는 급격하게 증가함을 보였다. 이는 -40℃ -50℃사이의 저온 취성의 영향으로 생각된다.

3. Shot peening재는 상온 25℃에서 -100℃사이의 저온까지 하한계 응력확대계수 ΔK_{th}=8 12.2MPa$\sqrt{m}$으로 나타났고 Unpeened재 역시 하한계 응력확대계수 ΔK_{th}=8.5 12.6MPa$\sqrt{m}$으로 나타났다. 온도의 저하에 따라 크랙진전속도가 감속하여 하한계가 증가함을 보였다.

4. 쇼트피닝 가공재 경우에 Unpeened재 보다 각 온도에서 피로수명의 향상을 보이고 있다. 피로수명의 향상은 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속의 영향으로 생각된다.

※ 참고문헌

(1) 박경동, 박상오, "저온 압력용기 강의 피로균열 진전속도 특성에 관한 연구" 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 16 22 (2001)

(2) 박경동, 김정호, 박상오, "원자로 압력용기용 강의 고온피로특성에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 23 28 (2001)

(3) 박경동, 박상오, "압력용기용 강의 저온 피로크랙전파 하한계 특성에 관한 연구", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 326 331 (2001)

(4) 박경동, 정찬기, "스프링강의 피로강도에 미치는 잔류압축응력의 영향", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 338 343 (2001)

(5) 박경동, 정찬기, 하경준, 박상오, 손명군, 노영석, "쇼트피닝 가공된 스프링강의 저온 피로균열진전 평가", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 282 285 (2001)

(6) 배성인, 한민구, 파괴역학 실험법, 원창출판사, pp. 8 11, 209, (1995)

(7) 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학, pp. 87 96, (1992)

(8) 정성균, 이승호, 쇼트피닝 加工概論, 世和출판사, pp. 13 29, 78 (2001)

(9) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99 125, (1999)

(10) P. C. Paris and F. Erdogan, Tran. of the ASME Ser. D, pp. 528 534, (1963)

(11) H. Liebowitz, Fracture. Vol, Ⅲ, (1971)

(12) 朴卿東, 原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙전이와 크랙開閉口 特性에 關한 研 究, 동아대학교 박사학위논문, (1983)

(13) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp10-16, (1989)

(14) 日本機械學會基準, 彈塑性 破壞引性 J 試驗方法, JSME S 001-1981

(15) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth

Rates ASTM : E647-93, (1993)

(16) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs , pp1 4, (1991)

(17) **小林英男**, **破壞力學**, **東京**, **共立出版株式會社**, pp. 57 63, 131 135, (1993)

(18) Y. Kitsunai, Fatigue Crack growth Behavior in Mild Steel Weld -ments at Low Temperature, pp280-290, (1991)

(19) ASTM Standard, E647-81, (1981)

(20) **禹興植 외** 2**명**, **재료파괴공학**, **서울**, **보성문화사**, pp. 147-170, 265 273, (1993)

A Study of the Spring Steel processed Shot Peening on the Low Temperature Fatigue Crack Propagation

Sang-oh Park

Dept. of Precision Mechanical Engineering,
Graduate School of Pukyong National University.

Abstract

Shot peening is a method that small steel balls. called "shot balls". are shot in high speed on the surface of metal. When the shot balls hit the surface. They make plastic deformation and bounce off. Which decrease the fatigue strength by getting residual compressive stress on the surface.

In this study, CT specimens were prepared from spring steel(SUP9) processed shot peening which was room temperature, low temperature and high temperature experiment. And we got the following characteristics from fatigue crack growth test carried out in the environment of room, low temperature and high temperature at 25℃, -30℃, -50℃, -70℃ and -100℃ in the range of stress ratio of 0.05 by means of opening mode displacement. The threshold stress intensity factor range ΔK_{th} in the early stage of fatigue crack growth (Region Ⅰ) and stress intensity factor range ΔK in the stable of fatigue crack growth (Region Ⅱ) was decreased in

proportion to descend temperature. It assumed that the fatigue resistance characteristics and fracture strength at low temperature and high temperature is considerable higher than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region.

Key words : Shot Peening(**쇼트 피이닝**), Residual Stress(**잔류응력**), Low Temperature(**저온**), Fatigue Crack Propagation(**피로균열전파**), Stress Ratio(**응력비**), Fatigue(**피로**), Cryogenic-Brittleness(**저온취성**)

Nomenclature

da/dN : Fatigue crack growth rate

K : Stress intensity factor

ΔK : Stress intensity factor range

ΔP : Load range

R : Stress ratio

K_{max} : Maximum Stress intensity factor

K_{min} : Minimum Stress intensity factor

C : Material constant

m : Fatigue crack growth exponent

a/W : Crack length of width ratio

$B_{eff}\ E'\ \frac{\nu}{P}$: Compliance

B_{eff} : Effective specimen thickness

B_{net} : Net thickness

E' : Elastic modulus of meterial

ν : Crack opening displacement(COD)

P : Load on specimen

C_g : Normalized K-gradient

감사의 글

보다 많은 것을 배우고자 시작한 것이지만 부족함과 아쉬움을 많이 남는 나날이었습니다. 지난 시간들 어려울 때 옆에서 격려와 희망을 주신 모든 분 들게 감사의 글을 올립니다.

먼저 본 논문을 위하여 시종일관 열성적으로 지도하여 주신 박경동 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 그리고 논문 심사에 아낌없는 충고와 지도를 하여 주신 김영대 교수님, 김형자 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 석사과정 중 많은 가르침을 주신 기계공학부 모든 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

본 논문을 완성하는데 도움을 준 파괴 및 재료강도실험실 선·후배님들에게 고마움을 전합니다. 특히 (주)대원강업에 정찬기 상무님과 하경준 차장님께 실험에 많은 도움을 주신 것에 대하여 깊은 감사 드립니다.

논문의 완성에 도움을 주신 공공기기센터 SEM실의 김도우님 실험기의 잦은 고장에도 불구하고, 끝까지 도움을 주셔서 정말 감사를 드립니다.

그리고 항상 변함 없는 옆에서 격려를 보내는 노창석 선배, 권광진 선배, 진훈구 선배, 김진훈 선배에게 고마움 마음을 전합니다.

또한, 언제나 격려와 위안을 주시며, 다독거려주신 제 마음의 스승이신 아버지, 그리고 제게 헌신적인 사랑으로 대해주시는 어머니와 믿음직한 형님께 감사한 마음을 대신하고자 합니다.

변함 없는 우정을 간직하며 서로의 길을 충실히 걷고 있는 친구들에게 이 기쁨을 함께 하고자 합니다.